

ビデオトラッカーを用いた三次元運動計測法について

原口 富博、二村 正

On a Measurement Method of Three Dimensional Motions
Using Two Video Trackers

By

Tomihiro HARAGUCHI and Tadashi NIMURA

Abstract

In model experiments on a vessel towed by a carriage, the optical motion measurement system using two video trackers and cameras is the most preferable because the optical system need only target lamps on a model and because we can measure the position and the motion of a towed model, even if she is far away from a towing carriage. In this paper, the measurement method of three dimensional motions of a model using the optical system is described as well as the components, procedures and measuring accuracy.

Furthermore, the optical measurement system was applied to a model experiment, in which models of a barge type and a semisubmersible type were towed by a carriage in regular and irregular waves. The motions of a model were measured by the optical system and also by gyroscopes and accelerometers on the model. The measurement results by the optical system are compared with those by the other equipments.

The conclusions in this paper are summarized as follows;

- (1) In this model experiment, the values of the orientation parameters to stand for the positions of two cameras are scattered within about 10% of the values measured by two transits. Therefore, it is advisable to use more precise value measured by other means for the distance between the camera and the origin of the earth-fixed coordinate system.
- (2) The optical measurement system using two video trackers is as much effective as gyroscopes and accelerometers to measure three dimensional motions of a model.
- (3) The optical measurement system makes it possible to measure a low frequency motion for which accelerometers are useless.

*運動性能部

原稿受付：平成2年6月13日

目 次

1. 緒言
 2. ビデオトラッカーを用いた3次元位置計測法
 2. 1 ビデオトラッカーによる3次元位置計測システム
 2. 2 ビデオトラッカーによる3次元位置計測原理
 2. 3 3次元位置計測精度
 3. ビデオトラッカーを用いた3次元運動計測法
 4. 水槽試験への適用
 4. 1 実験方法
 4. 2 計測システム
 4. 3 実験結果
 4. 3. 1 規則波中の被曳航浮体の動揺振幅
 4. 3. 2 規則波中の被曳航浮体の6自由度運動のタイムヒストリー
 4. 3. 3 不規則波中の被曳航浮体の運動のパワースペクトラム
 5. 結言
- 付録 ビデオトラッカーによる3次元位置計算法

1. 緒言

従来船体運動や海洋構造物の運動計測にはジャイロやポテンショメータなどの計測機器が使用されることが多いが、この方法では模型の排水量に制限がある場合や曳航台車から離れた場所での6運動の計測を行なう場合に難点がある。一方無接触型挙動計測装置¹⁾や光半導体位置検出器を応用した例²⁾の様な光学機器を利用した無接触型の計測法もあるが、多点の位置計測が出来る反面、発光ダイオードとカメラの同期をとるためにケーブルを渡す必要がある。今回、海洋構造物の曳航に関する研究の一環として曳航台車による曳航実験を行なったが、実験で被曳航浮体が曳航台車からかなり離れているためこの浮体の位置計測にこれらの計測法が適用できなかった。そこで、模型上に適当な目標があればよく、ケーブルを引く必要もないビデオトラッカー2台を用いた光学式運動測定装置を使用した。また、今回の実験では排水量やテレメータのチャンネル数の制限から6運動の一部を計測する事が出来なかったため、この装置による位置計測結果から被曳航浮体の6運動を求めた。この種のトラッカーを用いた3次元位置計測は既に行なわれている³⁾が、6運動を計測した例は見あたらない。そこでビデオトラッカーを用いた3次元運動の計測結果をジャイロなどによる運動計測結果と比較検討した。ここではこのビデオトラッカーを用いた計測法とその有効性について報告する。

2. ビデオトラッカーを用いた3次元位置計測法

2. 1 ビデオトラッカーによる3次元位置計測システム

今回用いた光学式運動測定装置の主要目とその構成のブロック図をそれぞれ表1、図1に示す。この装置はそれぞれ2台のCCDカメラ、ビデオトラッカー、モニターテレビ等から構成され、このうちの1台のビデオトラッカーの同期信号によってシステム全体の同期をとっている。2台のCCDカメラで捉えた4点までの目標は、輝点あるいは黒点として2台のビデオトラッカーで同時に追跡され、この

4点のそれぞれの図心が座標化され出力される。この値は計算機に取り込まれフロッピーディスクに記録される。

表-1 光学式運動測定装置の主要目

①	CCDカメラ (2台)
	レンズ : コズミカ TV ズーム レンズ 12.5~75mm
	絞り : 1.8~22
	有効画素数: 512(H)×492(V)
	解像度 : 水平 380本、垂直 350本
②	ビデオトラッカー (2台)
	型式 : G 2120
	計測点 : 4点
	分解能 : 512(H)×384(V)
	測定周期 : 1/30 秒以上
	検出能力 : (コントラスト) レベル差 0.3v以上 (対象) 3×3 ドット以上
	物体検出 : 輝点または黒点 (スイッチにより切替)
	方法 : の2値化画像における重心 (図心) を演算により求める。
③	その他
	モニター TV : 2台
	周期分配器 : 1台
	三脚 : 2台
	カメラケーブル : 10m, 2組
	ランプ (目標用) : 4個

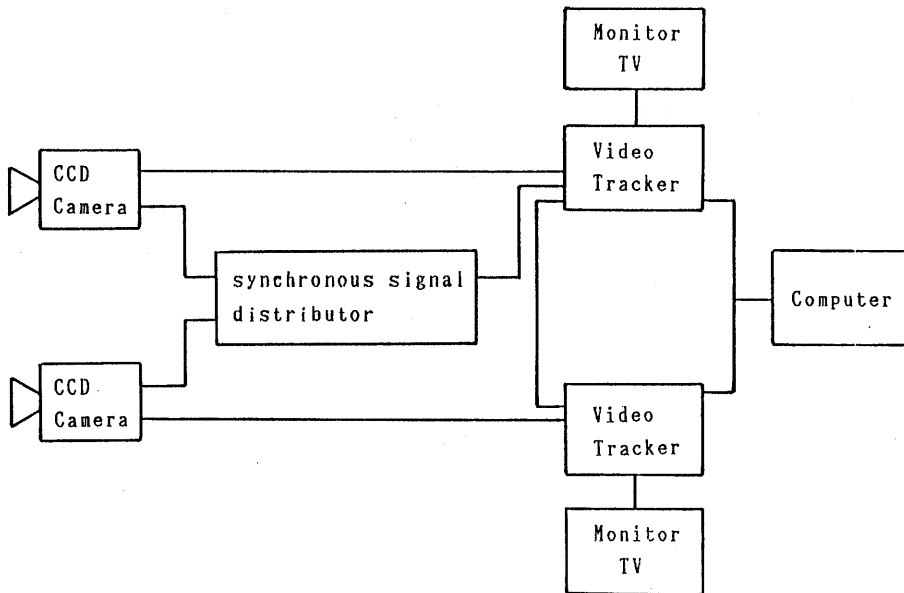


図-1 光学式運動測定装置の構成ブロック図

2. 2 ビデオトラッカーによる3次元位置計測原理

ビデオトラッカー2台を用いた3次元位置計測法は、原理的にはカメラを用いた写真測量における3次元位置計測法と同じであり、カメラによる計測値をアナログ量と考えるとビデオトラッカーはそのAD変換器ともいえるものである。以下その原理を参考文献⁴⁾⁵⁾に従い述べる。

図-2に示すように、カメラ座標系を $o-x'y'z'$ 、その z' 軸の負の方向に焦点距離 c だけ平行移動した2次元の写真座標系を $o'-x''y''$ 、地上座標系(空間固定座標系)を $O-XYZ$ とする。これらの座標系の関係は、例えば地上の対象物 P を写真撮影したとすると、この時のカメラのレンズ中心を原点とし P と反対方向を X 軸の正とする座標系がカメラ座標系であり、撮影された写真が写真座標系に相当する。今回はCCDカメラで撮影しているため、そのモニター画面はベタ焼きの写真に相当し、この写真内の対象物の2次元座標がビデオトラッカーにより計測される。従って対象物の地上座標を求める上で、この写真座標系と地上座標系の関係式が重要となる。この関係式は、地上座標系とカメラ座標系およびカメラ座標系と写真座標系の関係から求められる。

まず地上座標系とカメラ座標系の関係を求める。今地上の対象物 $P(X, Y, Z)$ がある時、この P のカメラ座標系における座標 (x_p, y_p, z_p) は次の座標変換式で与えられる。

$$\begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & -\sin\omega \\ 0 & \sin\omega & \cos\omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\phi & 0 & \sin\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\phi & 0 & \cos\phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\kappa & -\sin\kappa & 0 \\ \sin\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、 (X_0, Y_0, Z_0) はカメラ座標系の原点(投影中心)の地上座標であり、 (ω, ϕ, κ) は地上座標系に対するカメラ座標系の傾きを表している。

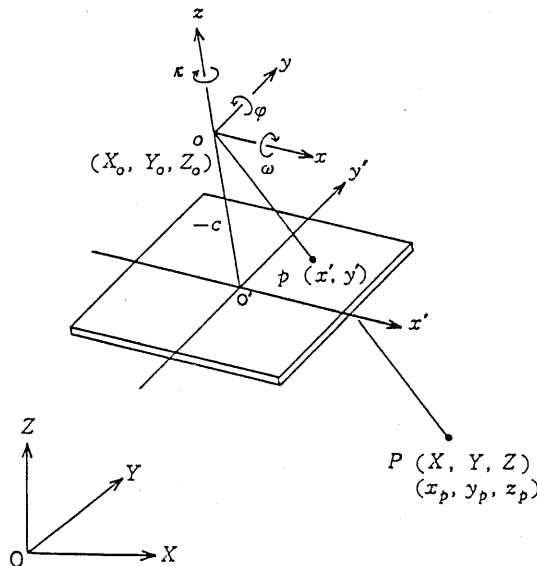


図-2 カメラの座標系

次に共線条件を用いて(1)式より写真座標系と地上座標系の関係式を求める。この共線条件というのは、図-2の地上の対象物Pとそれに対応する写真像およびカメラ座標系の原点oが一直線上にあるという条件である。この条件からカメラ座標系と地上座標系の間に関係が得られる。

$$\overline{op} / \overline{oP} = -c / z_p = x' / x_p = y' / y_p$$

ここで、cは焦点距離、(x', y')は地上の対象物Pに対応する写真像pの写真座標である。これと(1)式より写真座標系と地上座標系の関係が次式で与えられる。

$$\begin{aligned} x' &= -c \left(\frac{x_p}{z_p} \right) = -c \frac{a_{11}(X-X_0) + a_{12}(Y-Y_0) + a_{13}(Z-Z_0)}{a_{31}(X-X_0) + a_{32}(Y-Y_0) + a_{33}(Z-Z_0)} \\ y' &= -c \left(\frac{y_p}{z_p} \right) = -c \frac{a_{21}(X-X_0) + a_{22}(Y-Y_0) + a_{23}(Z-Z_0)}{a_{31}(X-X_0) + a_{32}(Y-Y_0) + a_{33}(Z-Z_0)} \end{aligned} \quad \text{----- (2)}$$

ここで、 a_{ij} は次に示す回転行列(R)の要素である。

$$R = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} a_{11} &= \cos \phi \cos \kappa, & a_{12} &= -\cos \phi \sin \kappa, & a_{13} &= \sin \phi, \\ a_{21} &= \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \phi \cos \kappa, \\ a_{22} &= \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \phi \sin \kappa, \\ a_{23} &= -\sin \omega \cos \phi, \\ a_{31} &= \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \phi \cos \kappa, \\ a_{32} &= \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \phi \sin \kappa, \\ a_{33} &= \cos \omega \cos \phi \end{aligned} \quad \text{----- (3)}$$

この(2)式は、カメラを(X_0, Y_0, Z_0)の位置におき(ω, ϕ, κ)の傾きの方向に地上の対象物Pを撮影したとき、対象物Pの地上座標と対応する写真像pの写真座標の関係を表している。この式は写真測量における基本式であり、この式から目標の地上座標を求めたりカメラの位置などを求める。この式の左辺のx'およびy'がビデオトラックの計測値になる。

(2)式でカメラの位置や傾きを表す6個の値 $X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa$ のことを外部標定要素と呼んでいる。この外部標定要素が求まったカメラで適当な目標を計測すると、(2)式でこの目標の地上座標である(X, Y, Z)が未知数となり、他の変数は既知となる。従って2台のカメラでこの目標を計測すると(2)式が解け、この目標の地上座標が求まる。これが3次元位置計測の原理である。この計算法については付録に示す。

また、この外部標定要素も(2)式から求めることができる。この作業を解析的キャリブレーションと言い、地上座標が既知の点(基準点)を計測して求める。既

知の点を計測すると、(2)式で(X, Y, Z)および(x', y')が既知となり、外部標定要素の6個が未知数となる。従って3個以上の既知の点を計測するとこの外部標定要素が求められる。

また(2)式は、焦点距離および主点(レンズ面に垂直に且つその中心に入射する光線が写真面に結像する点)の位置が正確で、レンズディストーションがなく、フィルム面も平面に保たれている測定用カメラに適用される共線条件の基本式である。このような完全な測定用カメラでない場合には、この式の写真座標x'及びy'から次の補正量Δx, Δyをそれぞれ差し引く必要がある。

$$\begin{aligned} \Delta x &= x_0 + x(k_1 r^2 + k_2 r^4) + (p_1 x + p_2 y + p_3 x y + p_4 y^2) \\ \Delta y &= y_0 + y(k_1 r^2 + k_2 r^4) + (p_5 x y + p_6 x^2) \\ r^2 &= (x'^2 + y'^2) / c^2 \\ x &= x' - x_0 \\ y &= y' - y_0 \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、(x₀, y₀)は主点位置のずれを示し、(k₁r²+k₂r⁴)を含む項は放射方向歪曲収差によるレンズディストーションを示し、最後の項はフィルムの平面度の歪を示す。測定用カメラでは、X₀, Y₀, Z₀, ω, φ, κの6つの外部標定要素のみが未知数であるのに対し、非測定用カメラでは、外部標定要素のほかに、x₀, y₀, c, k₁, k₂, p₁~p₆の内部標定要素が未知数として扱われる。

今回の計測ではビデオカメラを使用しており、フィルム平面度の項(p₁~p₆)は無視し得るものとする。また、レンズディストーションに関する項(k₁, k₂)についても考慮していない。そのため内部標定要素の未知数としてはx₀, y₀, cの3個となり、外部標定要素の6個と合わせて未知数は全部で9個となる。従って基準点が5個以上あれば(2)式から逐次近似解法(ニュートンラフソン法)によりX₀, Y₀, Z₀, ω, φ, κ, x₀, y₀, cの9個の未知数がもとまる。

2. 3 3次元位置計測精度

3次元位置計測精度を知ることは、この計測システムの計測精度を知る上で必要であることは言うまでもないが、曳航時の索の問題を考える上で曳航点から被曳航浮体までの距離やその計測精度を知ることは重要である。ここでは、今回行ったキャリブレーションの方法とその結果得られた3次元位置計測精度について述べる。

カメラの向きや位置を決めるとまず各カメラの標定要素を求める必要がある。この解析的キャリブレーションはカメラのセッティングを変えるたびに行なう必要があり、今回の実験では10回行なった。このキャリブレーションのフローを図-3に、向波状態でのカメラと基準点の配置例を図-4に示す。地上座標系O-XYZをY軸の正が紙面上方になるようにとり、2台のCCDカメラを曳航台車後端上に水槽幅方向にできるだけ間隔をおいて設置した。基準点は3次元に配置する必要があり、Y方向に上下2点ずつ8カ所計16個のランプを基準点として設置した。その設置法としては、図-5に示すようなアルミのアングルの枠に8個のランプを表-2に示す位置関係に取り付け、このアングルを約5m離れた2カ所に置くという方法をとった。この基準点の地上座標を測定し、併せてトラッカーで計測する。この結果(2)式から各カメラの標定要素が求まる。この時の基準点やカメラの配置が計測精度に影響するようである。

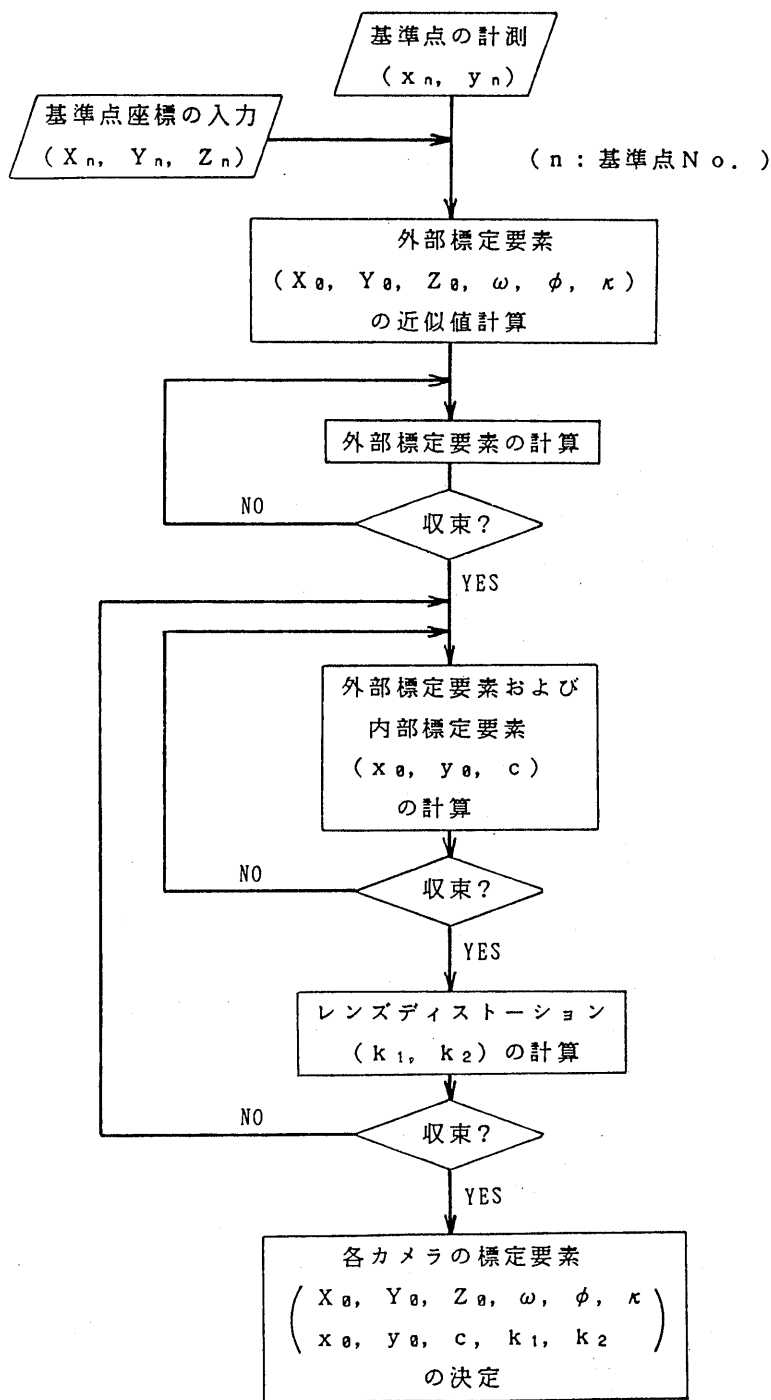


図-3 解析的キャリブレーションのフロー

表-2 キャリブレーション用ランプ座標

No.	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)
A1	0	0	0
A2	-0.4	1001.0	-6.9
A3	1000	999.3	-5.4
A4	999.5	-2.1	2.1
B1	3.4	-2.6	-977.9
B2	4.5	1000.4	-986.4
B3	1005.1	1000.6	-984.4
B4	1002.5	-1.9	-978.4

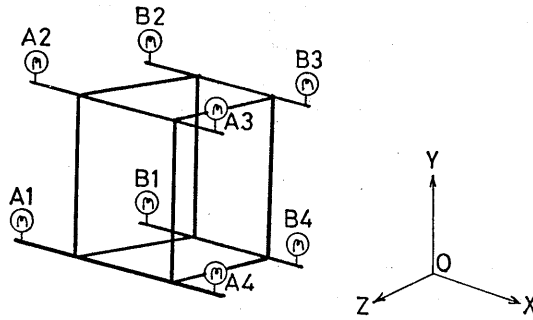


図-4 カメラおよび基準点配置例

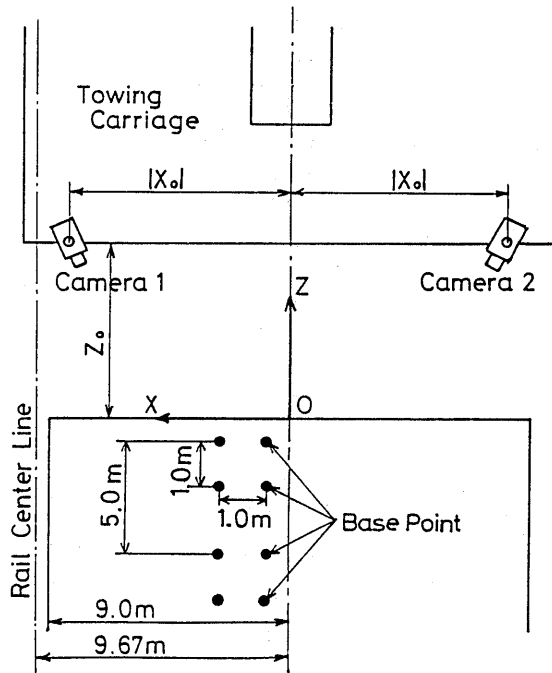


図-5 キャリブレーション用ランプ

キャリブレーションで求めたカメラの標定要素とこの時のビデオトラッカーによる計測値から基準点の地上座標を求めることができ、この基準点の計測値と実測値との比較によってその精度を知ることができる。こうして求めた誤差の一例を表-3に示す。これは図-4におけるカメラと水槽幅中心の地上座標系原点Oとの距離(Z_0)が約33.4mの時の例(表-4の Calibration NO. 3)である。これは計測誤差の空間的な分布を表しており、同時に目標の位置によって計測誤差が変化することを意味している。このことは3次元運動を行っている2個の目標間の距離の変化として知ることができる。今回行ったキャリブレーションでのこの計測誤差の最大値は、 Z_0 が約17.4mの時で32mm、約33.4mの時で58mmでいずれもZ軸方向であった。さらに、各キャリブレーションごとにX, Y, Zそれぞれの方向に対する二乗平均誤差を求めてみると表-4の様になる。17m以上離れた位置からの計測と言う点を考えるならば、この結果はかなり計測精度が良いことを示している。また、これらの結果からX, Y方向に比べてZ方向の精度が悪いことが解る。この原因としては、Z方向には基準点を5m程離して設置しているのに対し、X, Y方向には1m程しか離していないこと、カメラの向きがX, Y軸に比べてZ軸に平行に近いことが考えられる。Z軸方向の精度を改善するためには1つにはカメラの向きをZ軸に対して角度が大きくなる様にし、Z軸方向のトラッカーの分解能を上げることが考えられる。そのためにはカメラ相互の距離を大きくするなどカメラ設置上の工夫が必要である。今回は曳航台車の幅やカメラのケーブルの長さからこれ以上離すことはできなかった。

表-3 キャリブレーション時の計測誤差例

base point No.	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)
1	1.07	15.18	-11.14
2	4.63	0.71	-15.44
3	7.87	-0.90	-25.55
4	11.47	-2.69	-20.28
5	-13.03	4.37	-7.81
6	0.50	-4.13	58.09
7	-2.57	5.08	38.42
8	-6.14	-13.61	-21.12
9	1.67	-10.04	11.78
10	-2.78	-4.49	-20.10
11	0.24	-3.92	2.64
12	9.41	-10.74	1.71
13	-4.51	9.58	-20.55
14	-4.03	5.22	2.27
15	-3.52	9.91	28.02
root mean square error	6.21	7.99	23.87

表-4 キャリブレーション時の二乗平均誤差

calibration No.	root mean square error (mm)		
	ΔX	ΔY	ΔZ
1	5.12	5.07	10.58
2	5.63	5.93	10.05
3	6.21	7.99	23.87
4	3.54	5.57	7.97
5	6.02	10.61	26.53
6	4.07	5.67	17.50
7	5.05	8.79	17.22
8	6.40	4.27	10.34
9	3.92	3.64	13.21
10	5.40	7.22	11.70

曳航点と模型の重心までの距離測定において、カメラから地上座標系原点までの距離(図-4の Z_0)の値にキャリブレーションで求めた標定要素の値 Z_0 を用いることができれば、基準点の相対位置がわかっているだけでカメラから地上座標系原点までの距離を実測する必要がなく便利である。そこで、カメラの標定要素の内 X_0 、 Z_0 について精度を検討した。図-6、図-7が標定要素の値とトランシットで計測した実測値とを比較したものである。いずれも横軸が実測値、縦軸が標定要素の X_0 、 Z_0 である。 X_0 についてはその絶対値が示してある。図中、白抜きのマークがレンズディストーションの影響(4)式の k_1 、 k_2 の項)を考慮しない場合、黒塗のマークがそれを考慮した場合である。この図からレンズディストーションの影響を考慮しない場合、標定要素としてのカメラ位置が実測値に対して10%程度ばらついていることが解る。この原因としては、トラッカーの分解能の不足によるものであろう。分解能が上がればこのばらつきも減少するであろうし、先に述べた基準点の計測精度も向上することが予想される。この点を補うには、計測する運動に依じてできるだけレンズをズームアップし、トラッカーの分解能をあげる必要がある。また、この標定要素のばらつき改善についてのもう一つの方法として、レンズディストーションの項を考慮することが考えられる。これについて検討したのが図中黒塗りのマークである。レンズディストーションの影響を考慮した場合、幾分ばらつきが改善されることが窺える。この項を考慮する場合、レンズディストーションがレンズの中心から半径に比例して大きくなることを考えると、キャリブレーション時にカメラの計測画面全体にわたる基準点の配置が必要であろう。今回の実験ではこうしたキャリブレーションを時間の制限から行っていない。従って、原理的にはここまで考慮する意味はないが、パラメータが増えることにより精度的にはわずかながら改善されるようである。これ以外にも基準点の数や配置の影響を検討してみる必要もあろう。こうした標定要素のバラつき改善については今後の課題と考えている。

今回、曳航点から模型の重心位置までの距離測定においては、この標定要素のバラつきのためにカメラから地上座標系原点までの距離に標定要素の値を用いず実測値を用いることとした。従って、レンズディストーションの影響も考慮しないこととした。この結果曳航点から模型の重心位置までの距離測定上の誤差は、約60mm程度と考えている。

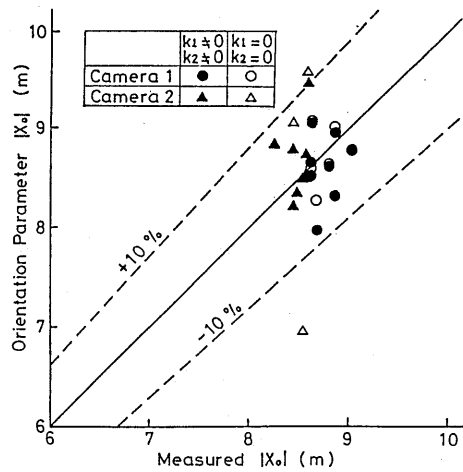


図-6 カメラ位置 (| X₀ |) の計測値と実測値との比較

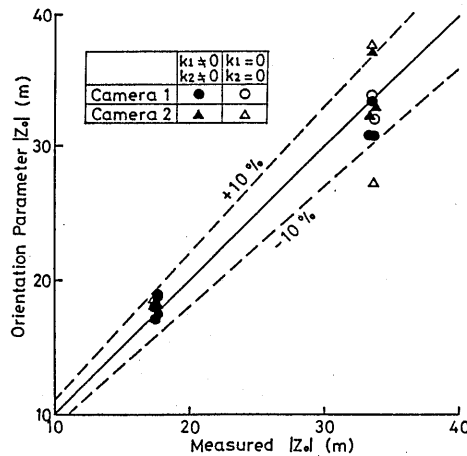


図-7 カメラ位置 (Z₀) の計測値と実測値との比較

3 ビデオトラッカーを用いた3次元運動計測法

今、図-8に示すように空間固定座標O-X Y Zをとり模型の重心Gを原点とする模型固定座標系G-x y zを考える。この時、模型上の目標P点の空間固定座標(X, Y, Z)と模型座標(x_p, y_p, z_p)との関係は(1)式と同様に次式で表わされる。なお、ここでの座標軸の取り方はカメラの座標系の場合とは異なっている。

$$\begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \kappa & \sin \kappa & 0 \\ -\sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X - X_G \\ Y - Y_G \\ Z - Z_G \end{pmatrix} \quad (6)$$

ここで、 (X_G, Y_G, Z_G) は空間固定座標系での模型の重心 G の座標であり、 (ω, ϕ, κ) は空間固定座標系からの模型座標系の傾きを表わしている。

今、この P 点を模型上に設置された目標(ランプ)とすると、この模型座標 (x_p, y_p, z_p) は既知であり、また空間固定座標 (X, Y, Z) も前記の位置測定法から既知である。従って (6) 式から $X_G, Y_G, Z_G, \omega, \phi, \kappa$ の 6 つが未知数となり、3 個以上の目標があれば (6) 式を解くことが出来る (目標 2 個では平面が決まらず変位角が求まらない)。(6) 式を逐次近似解法で解くと空間固定座標系での模型の重心位置 (X_G, Y_G, Z_G) および空間固定座標系と模型固定座標系との傾き ω, ϕ, κ が求まる。即ち、模型のサージング、スウェーイング、ヒービング、ローリング、ピッチング、ヨーイングの 6 運動が求まる。その計算フローを図-9 に示す。また、ここでは、空間固定座標に対する運動を求めているが、実際には曳航台車と一緒に定速で移動する移動座標系での運動を求めている。

今回の実験では、トラックが 4 点の目標を追跡できることから模型上に 4 点のランプを目標として設置した。このため未知数に対して方程式の数が多くなり、模型の重心位置での運動を求める際最小二乗法を用いている。この結果、前に述べた様な空間的な誤差の分布があっても、個々のランプ位置の計測誤差がある程度相互に打ち消しあうことが考えられ、計測誤差の変動があっても重心位置での運動の計測誤差は大きく変化しないものと推測される。

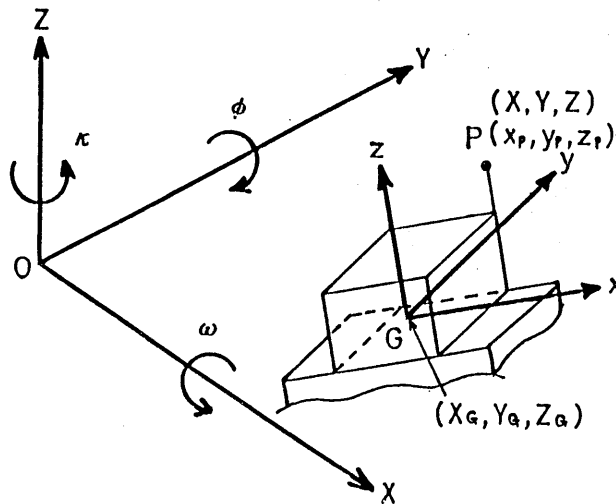


図-8 模型の座標系

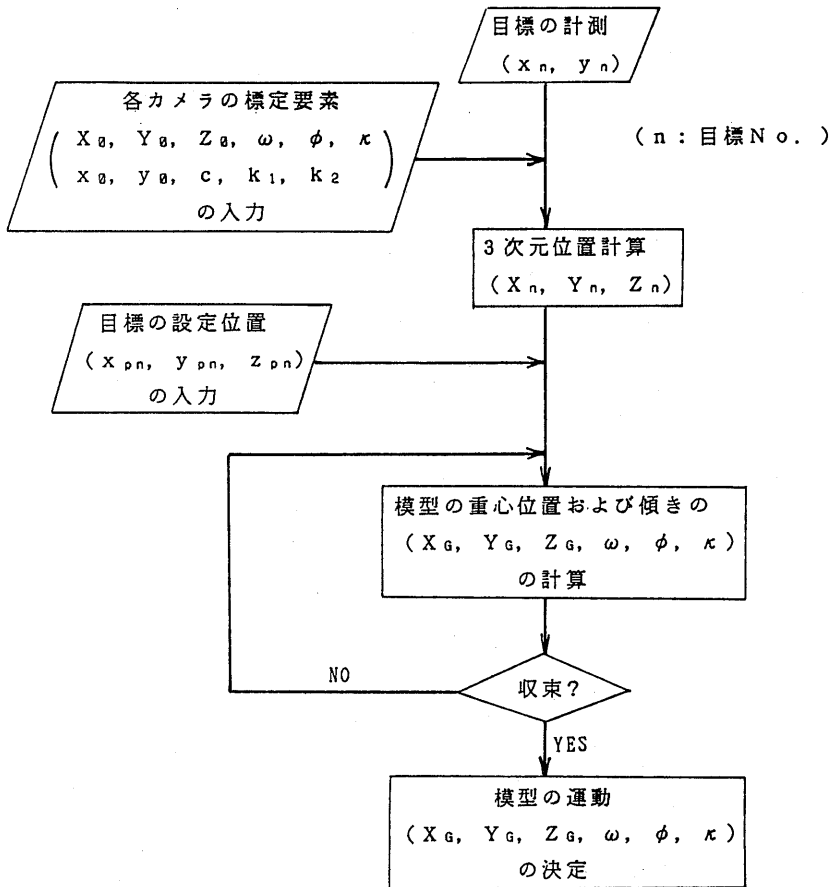


図-9 3次元運動計算フロー

4 水槽試験への適用

4.1 実験方法

実験は、曳航台車による曳航実験を三鷹第2船舶試験水槽（通称400m水槽）で行なった。被曳航浮体の模型としてはバージ型、セミサブ型の2隻を用いた。その主要寸法等を図-10、図-11に示す。ここで模型の状態はイーブンキールのみであり、バージ型の場合スケグがある状態と外した状態で行った。また、波は規則波・不規則波の2種類とし、出会い角は向波・追波の2種類である。表-6の不規則波の λ/L （ λ :波長）はセミサブの長さ（ $L=4.0\text{m}$ ）を代表長さとし、波スペクトラムのピーク周波数がその波長となるようにした目標値である。索長は規則波中では24mのみとし、不規則波中では40mのケースについても行った。曳航速度は 0.51m/s （実機で約 5.0kt ）と 0.72m/s （実機で約 7.0kt ）とした。模型（被曳航浮体）の曳航開始位置は、一部を除いて水槽幅中心位置から水槽幅方向にずらした位置（ $1.50\sim 3.00\text{m}$ 程度移動）から行った。これは初期外乱を与えて振れ回り運動が起きるかどうかを調べるためである。

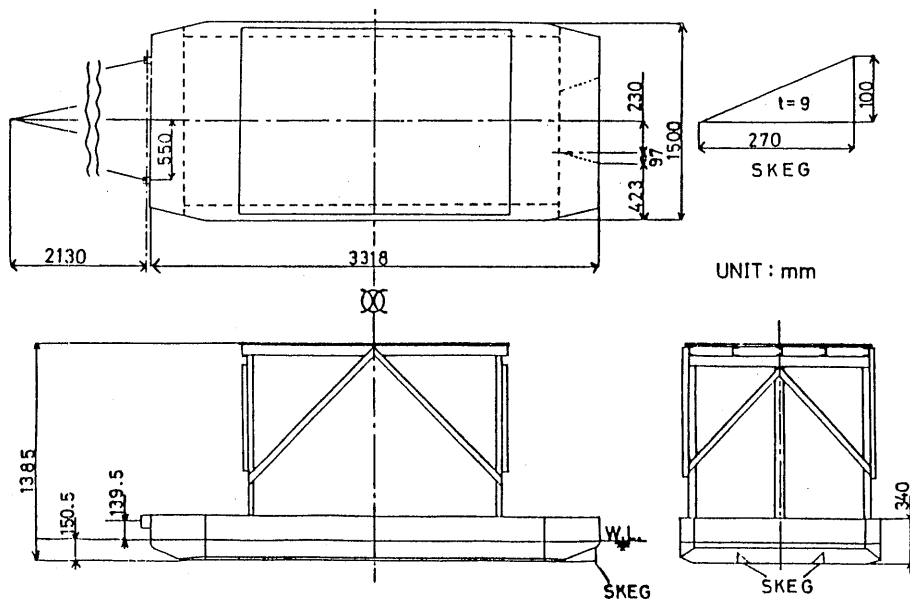


図-10 バージ型模型

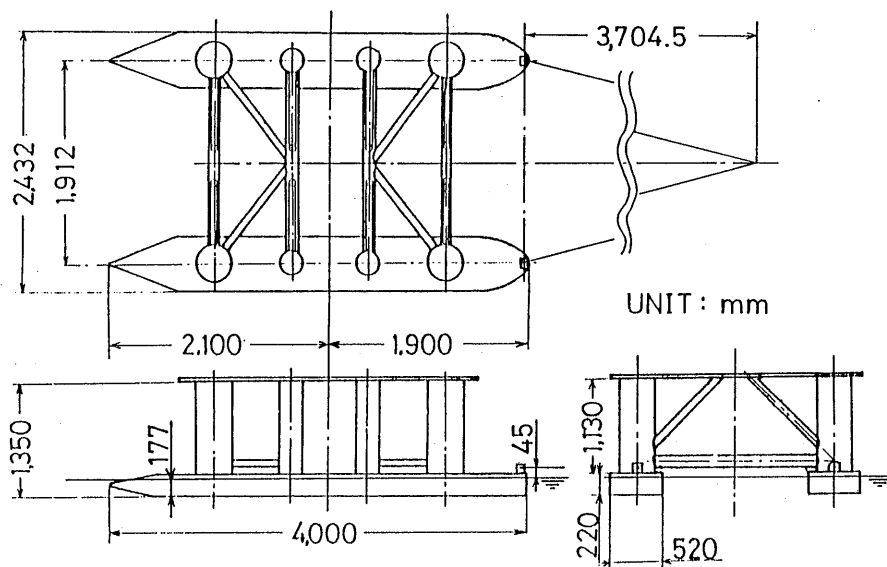


図-11 セミサブ型模型

4. 2 計測システム

計測システムについて、その概略図を図-12に示す。ジャイロやジャイロに内蔵された加速度計で計測された模型の運動などはテレメータで曳航台車に送り、曳航点での張力などとともにADコンバータを介して計算機に取り込んだ。ただし、テレメータのチャンネル数および模型の排水量の関係（セミサブ型では方位ジャイ

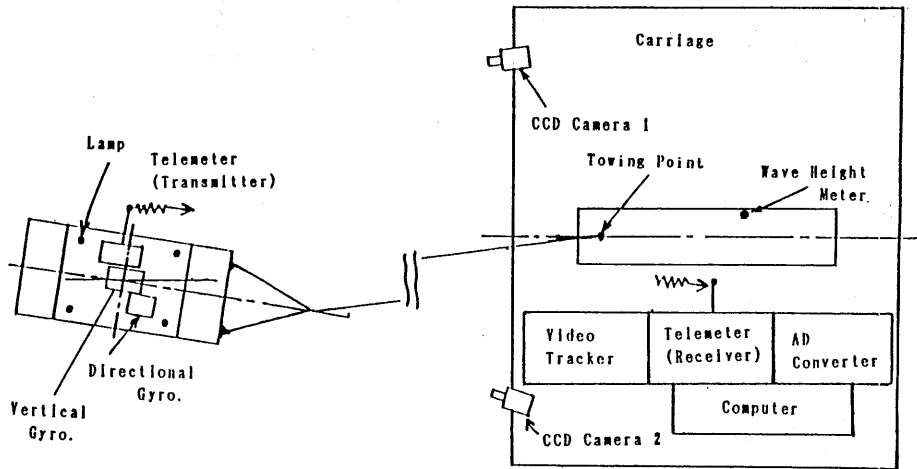


図-12 計測システム

ロが積載できなかつた)でバージュ型とセミサブ型で計測項目が異なっている。

また、模型上に4個のランプを目標として設置し、曳航台車上の2台のCCDカメラを介してビデオトラッカーで追跡している。このデータも計算機に同時に取り込んでいる。なお、このランプを輝点として追跡しているので、トラッカーのウィンドウの大きさを最小にしてもランプ近くに反射光や背景の輝点があると、正確な計測ができなかつたりあるいはウィンドウを奪われて計測できない場合がある。

4.3 実験結果

4.3.1 規則波中の被曳航浮体の動揺振幅

ここでは、向波および追波の規則波中を曳航台車に一定速度で曳航される時の被曳航浮体の動揺振幅について述べる。バージュ型については、振れ回り運動がないスケグがついた状態の結果のみを示す。

図-13から図-18にそれぞれバージュ型、セミサブ型のサージング、ヒービング、ピッチングの計測結果を示す。横軸は、 λ/L (ここでLはバージュ型、セミサブ型のそれぞれの長さ)をとり、縦軸は各振幅をサージング (X_0)、ヒービング (Z_0) については波振幅 (h_w) で、ピッチング (θ_0) については波傾斜 ($k h_w$ 、 k :波数)でそれぞれ無次元化したものを示している。図中白抜きで示したマークがジャイロおよび加速度計で計測した値であり、塗りつぶしたマークがビデオトラッカーで計測した結果である。サージングの計測値は、加速度計が重心より上(デッキ上)にあるため、前後加速度からピッチングの影響を除き、その運動の角速度 (ω rad/sec) の2乗で割り重心位置での変位に変換した値である。また、バージュ型のヒービングについては、加速度計による計測値がないのでトラッカーによる計測値のみが示してある。セミサブ型のヒービングもサージング同様上下加速度を重心位置の変位に変換している。このヒービングについてはピッチングやローリングの影響は小さいとして無視している。またピッチングについてはパーティカルジャイロによる計測値である。

Barge With Skag

	Fn	Tracker	Gyro. or Acc.
180°	0.090	●	○
0°	0.127	■	□

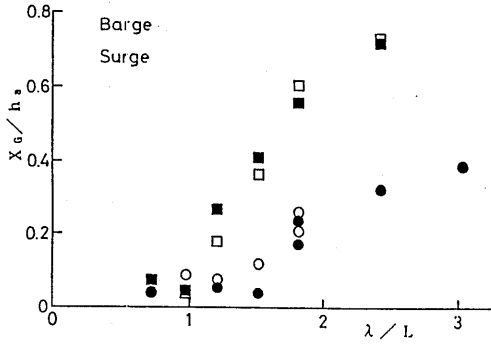


図 - 1 3 サージング (バージ型 (スケグ付))

Semisub

	Fn	Tracker	Gyro. or Acc.
180°	0.115	●	○
0°	0.115	■	□

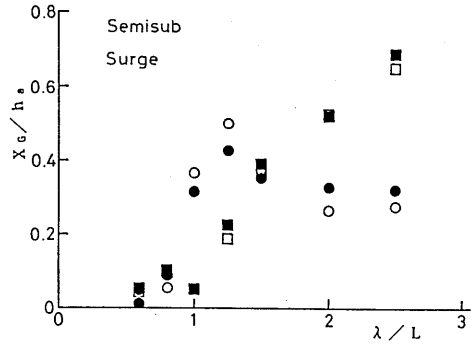


図 - 1 6 サージング (セミサブ型)

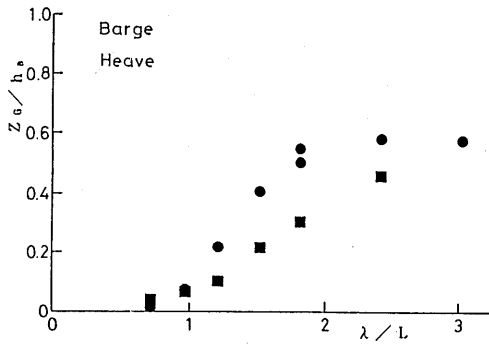


図 - 1 4 ヒーピング (バージ型 (スケグ付))

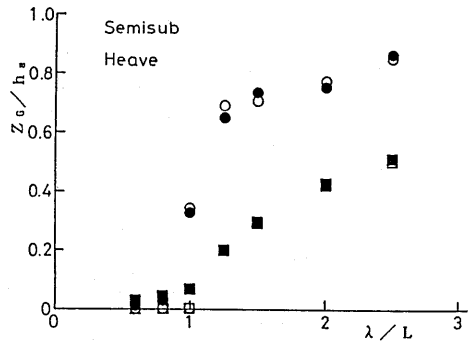


図 - 1 7 ヒーピング (セミサブ型)

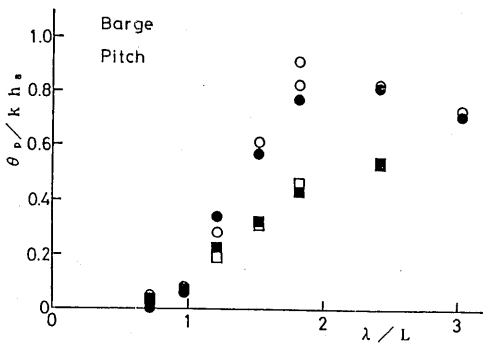


図 - 1 5 ピッチング (バージ型 (スケグ付))

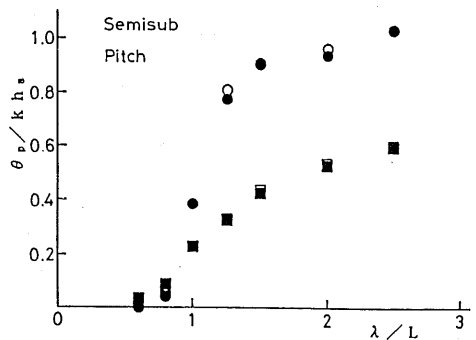


図 - 1 8 ピッチング (セミサブ型)

表-5 運動計測値の二乗平均誤差

model type & conditions		root mean square error (nondimension)		
		surge	heave	pitch
BARGE in heading sea	with skeg	0.0469	—	0.0580
	without skeg	0.0458	—	0.0287
BARGE in following sea	with skeg	0.0443	—	0.0208
	without skeg	0.0277	—	0.0076
SEMISUB in heading sea		0.0488	0.0245	0.0145
SEMISUB in following sea		0.0243	0.0370	0.0071

定義から明らかなように、トラッカーによるサージングの計測値は空間固定座標系における前後動に対し、加速度計によるサージングは模型固定座標系での前後動であり、厳密には一致しないがここではその影響は無視している。

これらの結果を見ると、トラッカーによる計測値とジャイロおよび加速度計による計測値は良い一致を示しており、その有効性が解る。2. 3で述べた3次元位置計測上の誤差があるにもかかわらずこれだけ一致しているのは、今回の計測範囲では3次元運動を求めた段階でこの誤差がほぼ一定となり、動揺振幅に対してはその誤差が打ち消されたのではないかと思われる。また、これらの無次元の動揺振幅から両計測法間の二乗平均誤差を求めたのが表-5である。計測された運動が最大値で0.8~1.0とあまり大きくなく、加速度計やジャイロによる計測値にばらつきがあることを考えると、この表からも両計測法による値が良く一致していることがわかる。

4. 3. 2 規則波中の被曳航浮体の6自由度運動のタイムヒストリー

ビデオトラッカーによる計測値とジャイロ及び加速度計による計測値をそれぞれ時系列で比較した例を図-19、図-20に示す。加速度計で計測したバージ型のサージングとセミサブ型のヒーピングについては、4. 3. 1と同様の方法で重心の変位に変換した値が示してある。

図-19はスケグがついていないバージ型の例で、索長24m、曳航速度0.72m/sec、 $\lambda/L=1.5$ ($L=4.0m$)の規則波中追波の状態で振れ回り運動を起こしたものである。

スウェーイングとヒーピングについてはトラッカーの計測値のみであり、加速度計による計測値はない。ローリング、ピッチングについては両計測法でその振幅が良く一致しており、ヨーイングに至ってはその差異も解らない程である。サージングについては出会い波周期の成分である短い周期の振幅についてはトラッカーと加速度計ではほぼ一致している。長周期の成分については、スウェーイングやヨーイングの記録から解るようにこれは振れ回りの周期の半分の周期であり、振れ回りに伴

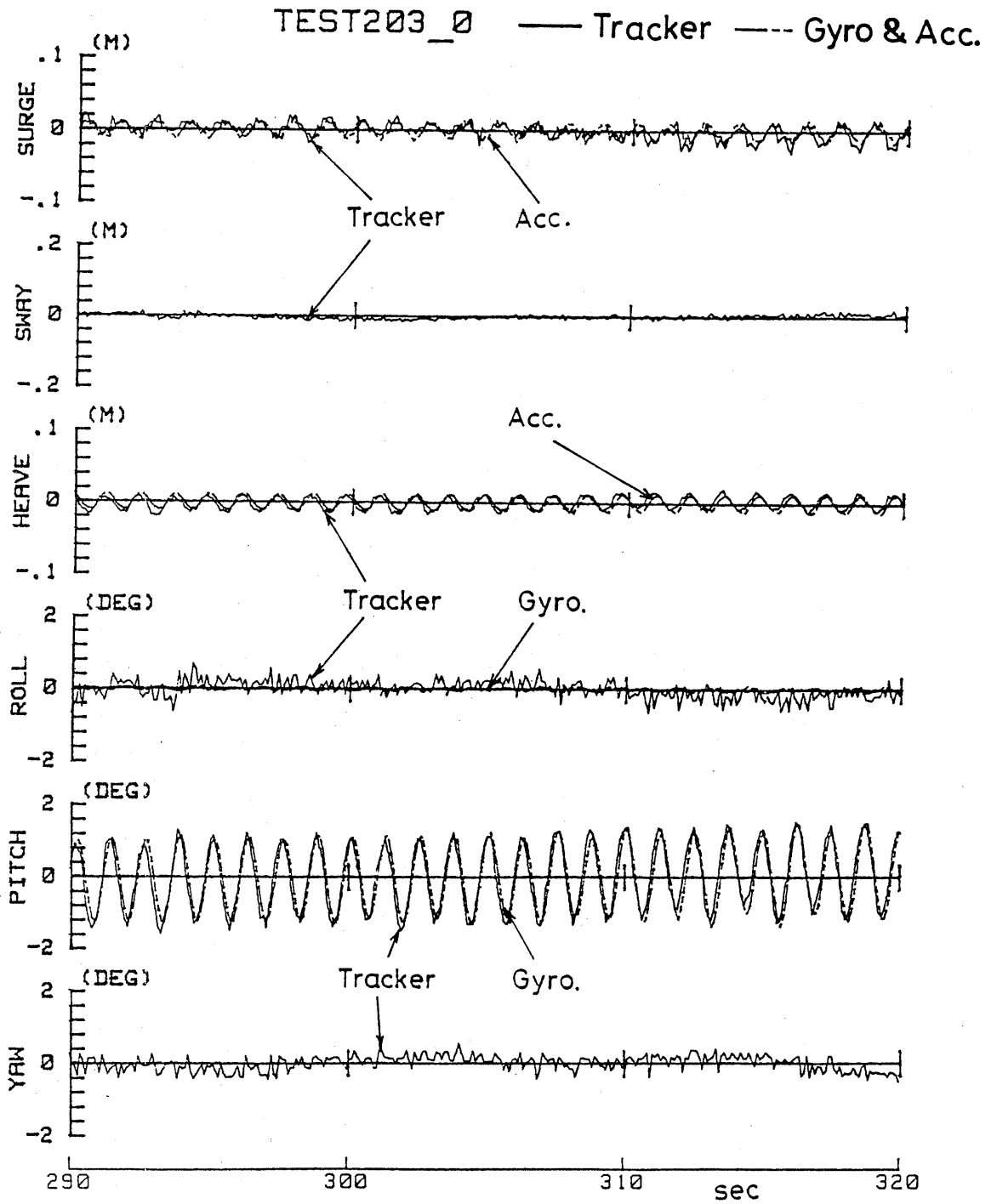


図-19 時系列データの比較 (バージ型 (スケグなし))

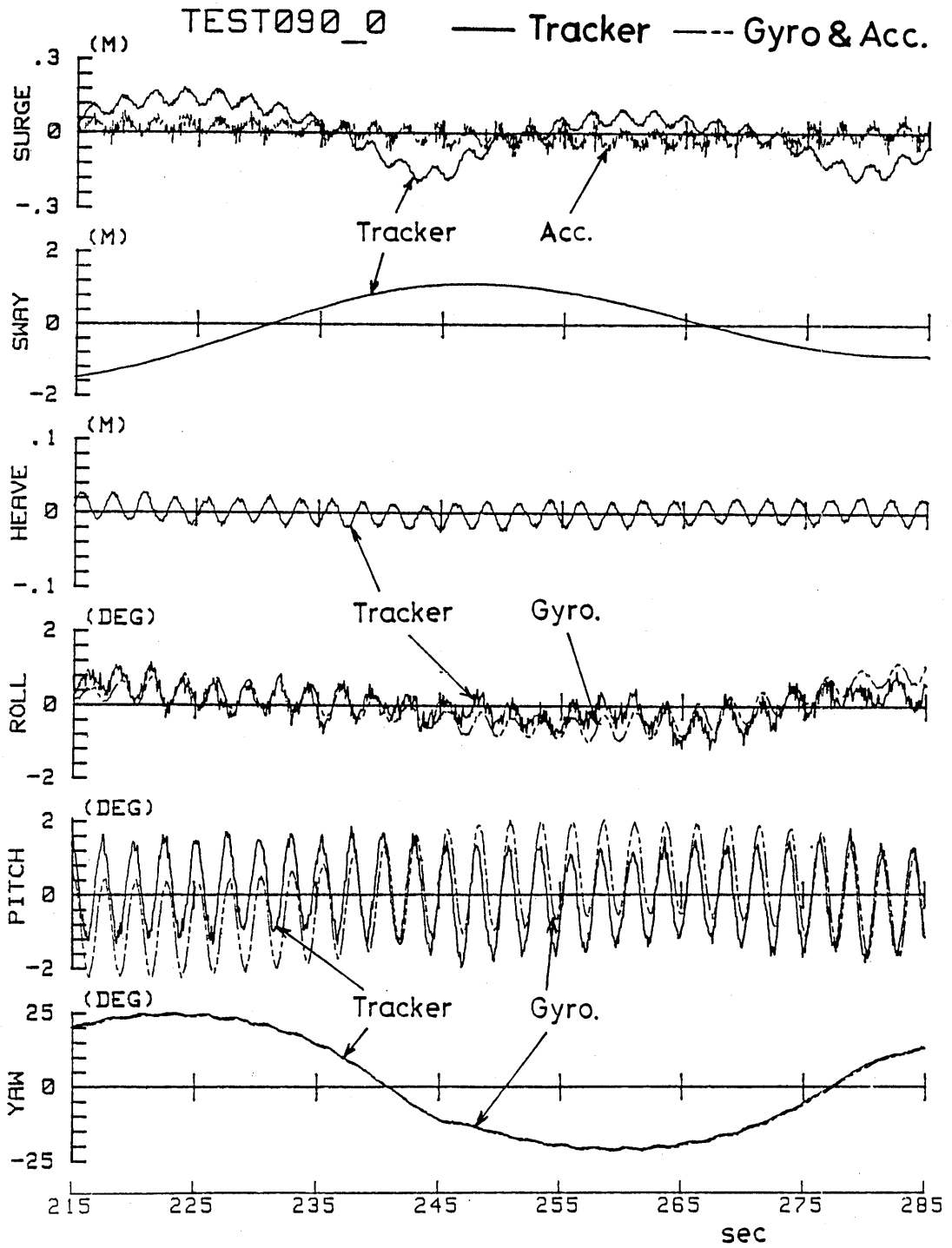


図-20 時系列データの比較 (セミサブ型)

うサージングを表している。こうした長周期成分を加速度計で計測することは困難と思われ、光学式計測法を用いる上での大きな長所とも言える。

図-20はセミサブ型の例で、索長24m、曳航速度0.72m/sec、 $\lambda/L=1.0$ ($L=4.0$ m)の規則波中向波の状態のものである。

スウェーイングとヨーイングについてはトラッカーの計測値のみであり、加速度計やジャイロによる計測値はない。サージング、ピッチングについてはバージ型の場合と同様両計測法でその振幅が良く一致しており、バージ型では比較できなかったヒーピングもよく一致していることが解る。またこの他の運動については、トラッカーの計測値に出会い波周期より短い高周波のノイズが現われている。これは、ビデオトラッカーの分解能によるものと推測される。この現象は図を拡大していくと6運動全ての記録にも見られるが、ただその振幅は小さく実用上は問題ないものと考えられる。

4. 3. 3 不規則波中の被曳航浮体の運動のパワースペクトラム

ここでは不規則波中の被曳航浮体の運動のスペクトラム解析結果の一部を図-21~図-23に示す。横軸は運動角速度(ω rad/sec)で、縦軸がそれぞれのパワー

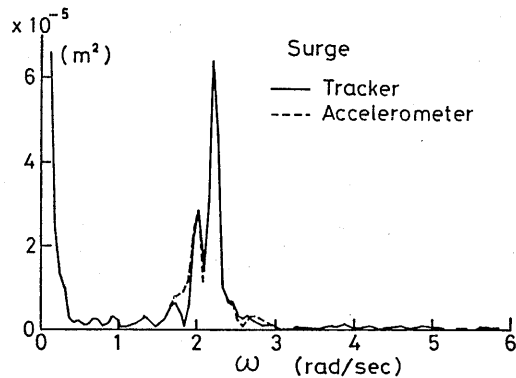


図-21 サージングのパワースペクトラム (バージ型 (スケグなし))

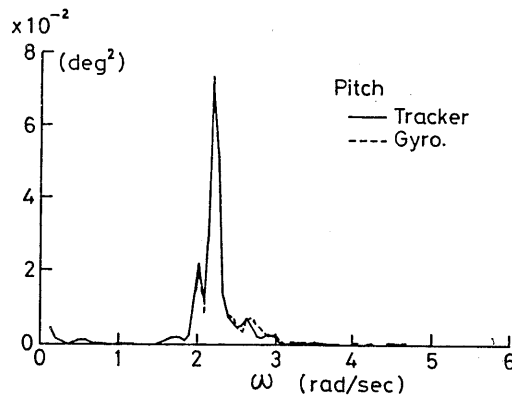


図-22 ピッチングのパワースペクトラム (バージ型 (スケグなし))

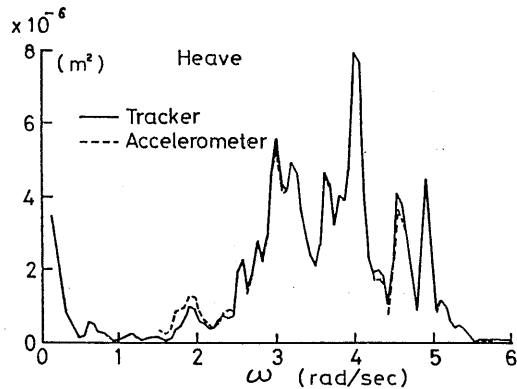


図-23 ヒービングのパワースペクトラム (セミサブ型)

スペクトラムを表わしている。また実線および波線はそれぞれトラッカーによる計測結果とジャイロおよび加速度計で計測した結果を表わしている。

図-21、図-22はバージ (スケグなし) の場合で、策長が40m、曳航速度 (V) が0.72m/sec、目標中心波長が $\lambda/L=2.5$ ($L=4.0$ m) の時のサージングとピッチングを示している。ここでサージングは、加速度計の計測結果からピッチングの影響を除いて求めたパワースペクトラムを各運動角速度ごとにその ω^4 で割って変位に変換した値を示してある。ただし ω が小さくなるにつれてその値は発散していくのでおおよそ $\omega=1.5$ より小さいところではスペクトラムをカットしてある。これらの図からトラッカーの計測値から求めたスペクトラムがジャイロや加速度計の計測値から求めたスペクトラムと低周波成分を除いてよく一致していることが解る。トラッカーで求めたサージングのスペクトラムで ω がゼロ付近の低周波の成分にも大きなスペクトルが見られるが、これはスウェーイングやヨーイングのスペクトラムにも見られることから振り回り運動によるものと考えられる。

図-23はセミサブの場合で、策長が24m、 $V=0.72$ m/sec、目標中心波長が $\lambda/L=1.5$ ($L=4.0$ m) の時のヒービングを示している。サージング同様加速度計の計測結果から求めたパワースペクトラムを各運動角速度ごとにその ω^4 で割って変位に変換した値を示してある。この図からも両計測法によるスペクトラムが低周波成分を除いて良く一致していることが解る。なお、トラッカーで求めたヒービングにも比較的顕著な低周波成分があるが、これはこの時の他の運動のスペクトラムや時系列データから見ると実験開始時の外乱がまだ残っているためと推測される。

5. 結言

ビデオトラッカーによる位置計測法および模型の6運動の計測法について述べ、その位置計測上の精度を検討した。さらにこれを曳航台車で波浪中を一定速度で曳航した場合の被曳航浮体の位置および運動計測に適用し、この計測法による計測結果とジャイロおよび加速度計による計測結果との比較を動揺振幅、時系列、パワースペクトラムについて行い次の結論を得た。

(1) 今回の実験では、カメラの標定要素であるカメラ位置の値は実測値と比べて10%程度バラついており、カメラと地上座標原点までの距離の値には実測値を使用

した方がよい。

(2) ビデオトラッカーを用いてバージ型、セミサブ型の2隻の被曳航浮体の6運動を計測した結果、ジャイロおよび加速度計で同時に計測した結果と遜色がなくその有効性が確認できた。

(3) 波浪中での振れ回り運動の例では、出会い波周期のサージングとともに振れ回り運動による長周期のサージングやスウェーイングを計測できた。この長周期の運動は加速度計では計測することは困難であり、改めて光学式計測法の利点を確認した。

最後に、今回の実験で御指導頂いた運動性能部野中室長および御協力頂いた海洋開発工学部の原、山川両主任研究官をはじめとする関係者各位へ改めて謝意を表します。

参考文献

- 1) 安藤定雄ほか 無接触型挙動計測装置の適用について
第42回船研講演集(1983.12)
- 2) 田中久仁雄 水槽試験における光学式非接触型3次元運動計測法
石川島播磨技法 第25巻第4号(1985.7)
- 3) 長谷川和彦 波浪中の船体6自由度非接触型計測システム
関西造船協会誌 第210号 (1988.9)
- 4) 日本写真測量学会編 写真よる三次元測定—応用写真測量—
共立出版株式会社(1983.6)
- 5) 日本写真測量学会編 解析写真測量
(社)日本写真測量学会(1983.6)

附録 ビデオトラッカーによる3次元位置計算法

標定要素が求まった2台のCCDカメラで適当な目標物(ランプ)を追跡しトラッカーで計測すると(2)式から目標物の3次元位置座標が求まるが、その計算法は以下の通りである。

① 2台のカメラの標定要素から、式(3)によりそれぞれの回転行列(R)の要素 $a_{ij}^{(k)}$ ($k=1, 2$;カメラの番号)を計算する。

② 次に三次元座標を求めたい目標の写真座標 $p_1(x_1', y_1')$, $p_2(x_2', y_2')$ (ここで1, 2はカメラの番号)を与える。即ち、ビデオトラッカーの計測値に(4)式の修正を行う。

③ (1)式を次の様に変形して観測方程式をたてる。

$$\begin{array}{l} X - u_1 Z = X_{01} - u_1 Z_{01} \\ Y - v_1 Z = Y_{01} - v_1 Z_{01} \\ X - u_2 Z = X_{02} - u_2 Z_{02} \\ Y - v_2 Z = Y_{02} - v_2 Z_{02} \end{array} \quad \text{----- (付. 1)}$$

ここで、 (X_{01}, Y_{01}, Z_{01}) と (X_{02}, Y_{02}, Z_{02}) は各カメラの投影中心である。 u_k, v_k は次式で与えられる。

$$u_k = \frac{a_{11}^{(k)} x_k + a_{21}^{(k)} y_k - a_{31}^{(k)} c}{a_{13}^{(k)} x_k + a_{23}^{(k)} y_k - a_{33}^{(k)} c}$$

$$v_k = \frac{a_{12}^{(k)} x_k + a_{22}^{(k)} y_k - a_{32}^{(k)} c}{a_{13}^{(k)} x_k + a_{23}^{(k)} y_k - a_{33}^{(k)} c}$$

④ (付. 1)式に最小二乗法をあてはめ、三次元座標(X, Y, Z)を次式で求める。

$$\begin{pmatrix} 2 & 0 & -\sum u_k \\ 0 & 2 & -\sum v_k \\ -\sum u_k & -\sum v_k & \sum (u_k^2 + v_k^2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum X_{0k} - \sum u_k Z_{0k} \\ \sum Y_{0k} - \sum v_k Z_{0k} \\ -\sum u_k (X_{0k} - u_k Z_{0k}) \\ -\sum v_k (Y_{0k} - v_k Z_{0k}) \end{pmatrix}$$